

Petr HORYL<sup>1</sup>

## POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ EXPLOZNÍ ODOLNOSTI ZÁSObNÍKU UHLÍ

### COMPUTER SIMULATION OF COAL BUNKER EXPLOSION RESISTANCE

#### Abstrakt

V případě kolapsu konstrukce sila v důsledku vnitřní exploze, mohou vzniknout vážné a nebezpečné efekty. Z tohoto důvodu je nutné analyzovat tento dynamický problém počítačovým modelováním. Problém je nelineární ze dvou důvodů – geometrických a materiálových vlastností. Výsledkem numerického řešení jsou konstrukční doporučení.

#### Klíčová slova

Vnitřní exploze, nelineární dynamický problém, zásobník uhlí.

#### Abstract

In case of silo structure collapse due to internal explosion there could be a serious and dangerous effect. Because of it, it is necessary to analyze this dynamics problem by computer modeling. The problem is nonlinear from the two reasons – geometrical and material properties. Numerical solution resulted in design recommendation.

#### Keywords

Internal explosion, non-linear dynamic problem, coal bunker.

## 1 ÚVOD

Podle Eurokódu [1] byla zařazena posuzovaná konstrukce do třídy CC3, což znamená, že v případě poruchy konstrukce od vnitřního výbuchu prachu hnědého uhlí mohou nastat „velké následky poruchy“. Pro analýzu je vhodné použít zdokonalené metody výpočtu jako je dynamická analýza nelineárního výpočtového modelu. Nelinearity jsou dvojího typu a to geometrické a materiálové. Geometrické nelinearity znamenají, že tuhost prvků je závislá na deformaci a v iteračním způsobu výpočtu se v každém kroku musí tuhost přepočítávat. Poněvadž při rázovém charakteru účinku výbuchu dojde s velkou pravděpodobností k rozkmitání konstrukce, je možný vícenásobný přechod meze kluzu materiálu. Proto je nutné zavést kombinovaný bilineární materiálový model oceli s izotropním i kinematickým zpevněním. Pro tento materiálový model potřebujeme mimo meze kluzu a tangenciálního modulu pružnosti šest materiálových konstant, které byly převzaty z disertační práce [2]. Mez kluzu oceli je  $\sigma_y = 240$  MPa a tangenciální modul pružnosti je  $E_T = 1176$  MPa. Šest konstant popisujících charakter křivky zatěžování nad mezí kluzu má tyto hodnoty (údaje jsou v [MPa]):

Tab. 1: Materiálové konstanty křivky zatěžování

C1	C2	C3	C4	C5	C6
45000	230	400000	3000	5000	0

<sup>1</sup> prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c. Katedra mechaniky, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 324 351, e-mail: petr.horyl@vsb.cz.

Nutnost dynamického nelineárního výpočtu je zdůrazněna v normě [1] v odstavci 5.2 Popis zatížení.

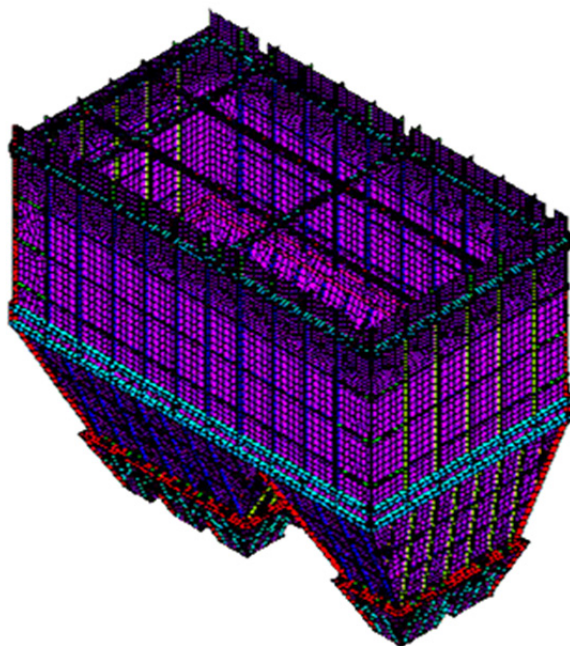
Velmi důležitou informací pro posouzení odolnosti OK zásobníku je odstavec 5.3 citované normy s názvem Zásady navrhování. Zde se definují způsoby, jak omezit účinek vnitřního výbuchu. Má se použít jedno z následujících opatření:

- návrh konstrukce realizovat tak, aby odolala maximálním tlakům výbuchu;
- použít výfukové prvky se stanovenými výfukovými tlaky.

Další navrhovaná opatření nejsou v našem případě použitelná. Proto byly výpočty provedeny jednak pro stávající konstrukci zatíženou plným explozním tlakem v časovém průběhu doporučeném normou [1]. Pokud konstrukce vyhoví, bude další výpočet zbytečný. Pokud nevyhoví, bude proveden druhý výpočet pro takový tlak, který uvede výfukový ochranný systém do činnosti. Výsledkem druhého výpočtu bude také návrh průřezu výfukových prvků.

## 2 DYNAMICKÝ NELINEÁRNÍ VÝPOČET OD PLNÉHO TLAKU VNITŘNÍHO VÝBUCHU

Výpočtový model včetně rozdělení na konečné prvky je na obrázku 1.

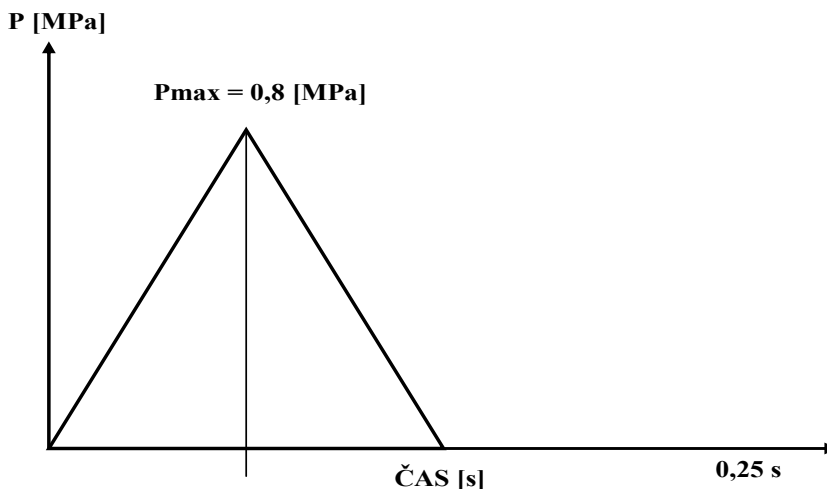


Obr. 1: Výpočtový model zásobníku hnědého uhlí

Tab. 2: Struktura výpočtového modelu vytvořeného v programu ANSYS [5]

	Celkem	Skořepiny SHELL63	Nosníky BEAM4
Počet prvků modelu	49359	30730	2648
Celkový počet uzlů	28713		
Celkový počet stupňů volnosti	170 862		
Hmotnost konstrukce zásobníku	45 602 kg		

Klíčovým parametrem výbuchového materiálu je deflagrační index oblaku prachu v  $[(\text{kN/m}^2) \text{ m/s}]$ , který má podle podkladů [3] hodnotu  $K_{St} = 18300 [\text{kN/m}^2 \cdot \text{m/s}]$ . Pro rozmezí koeficientu  $K_{St}$  od 1000 do 30000  $[\text{kN/m}^2 \cdot \text{m/s}]$  jsou uvedeny v příloze D normy [1] maximální tlaky výbuchu prachu  $p_{\max}$ . Lineární interpolací dostaneme pro naši hodnotu  $K_{St}$  maximální tlak výbuchu  $p_{\max}$ . Při výbuchu prachu dosahují tlaky nejvyšší hodnoty v časovém rozpětí 20 až 50 ms. Průběh tlaku byl realizován podle obrázku 2.



Obr. 2: Průběh tlaku při výbuchu uhlí

Jak je zřejmé z obrázku, výpočet byl rozdělen na tři zatěžující kroky. Dokmitávání (doznívání účinku) bude probíhat do času 0,25 s. V tomto čase dynamický jev prakticky odezní.

Pro dynamický výpočet bylo nutné určit míru tlumení konstrukce stanovením matice tlumení  $[D]$ . Za předpokladu převažujícího strukturálního tlumení konstrukce, které je úměrné matici tuhosti  $[K]$ , lze matici tlumení definovat následující rovnicí

$$[D] = \beta [K]. \quad (1)$$

Lineární součinitel tlumení  $\beta [s]$  se určí z rovnice

$$\beta = \frac{2\xi_1}{\Omega_1}, \quad (2)$$

kde:

$\xi_1$  je poměrný útlum nejnižší vlastní frekvence

$\Omega_1$  je nejvyšší vlastní kruhová frekvence systému.

Pro určení matice tlumení bylo nutné vypočítat netlumené vlastní frekvence konstrukce. Nejnižší vlastní kruhová frekvence má hodnotu  $\Omega_1 = 64,86 \text{ rad.s}^{-1}$ . Poměrný útlum  $\xi_1$  byl zvolen podle [4] hodnotou 0,01. Pak součinitel  $\beta = 3,08\text{E-}4 \text{ s}$ .

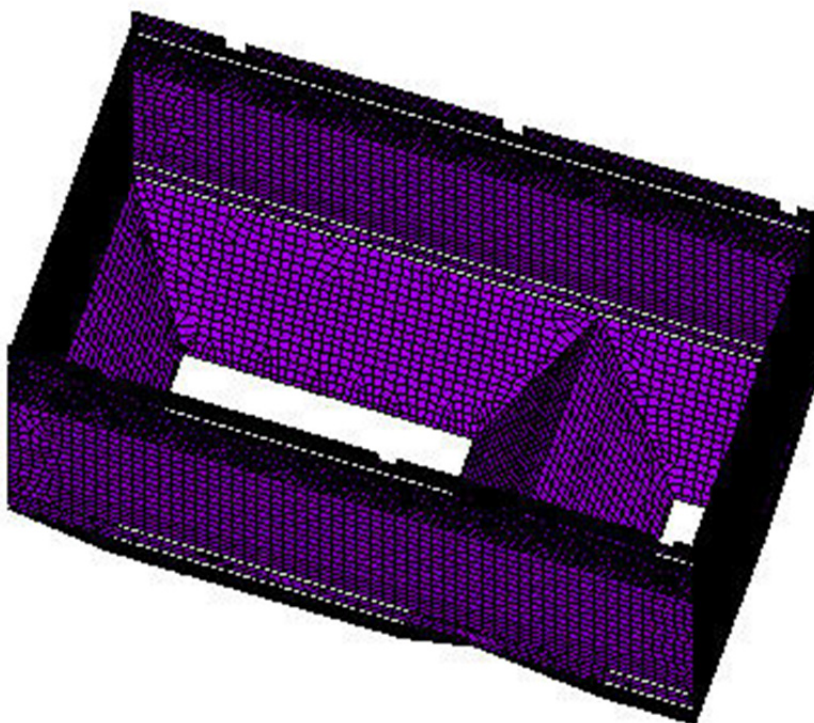
Dalším důležitým krokem je stanovení nejnepríznivější kombinace zatížení pro řešený problém. Jde o mimořádnou kombinaci zatížení, která bude obsahovat:

- tlakové zatížení od výbuchu - součinitel kombinace zatížení  $\Psi_1 = 1$ ;
- vlastní tíha konstrukce součinitel kombinace zatížení  $\Psi_2 = 1$ ;
- technologické zatížení od náplně hnědého uhlí - součinitel kombinace zatížení  $\Psi_3 = 0,8 - 0,9$ .

Nejnepríznivější souhra těchto tří typů zatížení nastane v případě vyprazdňování či plnění prázdného zásobníku. Tlak od výbuchu bude působit na velkou vnitřní plochu zásobníku. Tento účinek je převažující. Pro orientaci poměr maximálního dynamického tlaku k maximálnímu tlaku

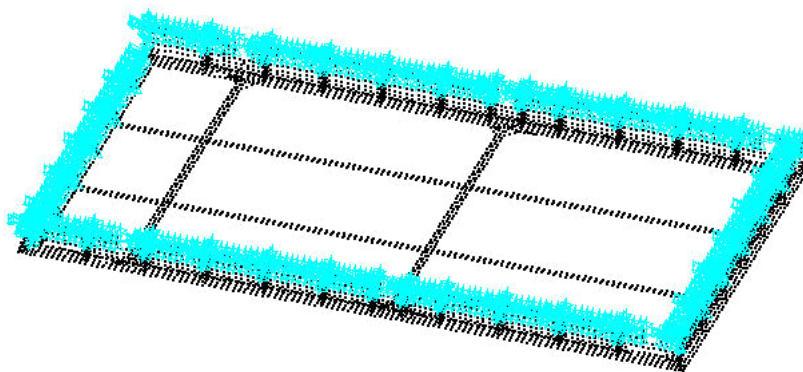
statickému od tlaku hnědého uhlí je cca 22,8. Předpokladem je zaplnění zásobníku pouze v osmi výsypkách. Vliv hmotnosti náplně byl zahrnut do dynamického modelu formou diskrétních hmotností v uzlech modelu pláště zásobníku.

Všestranný tlak od výbuchu je zaveden na všechny vnitřní stěny zásobníku, vyjma stěny osmi výsypek, které v dané situaci obsahují uhlí, viz obrázek 3. Tlak výbuchu, který působil na povrch hnědého uhlí ve výsypkách byl uvážen jako svislé zatížení uzlů modelu pláště výsypek.

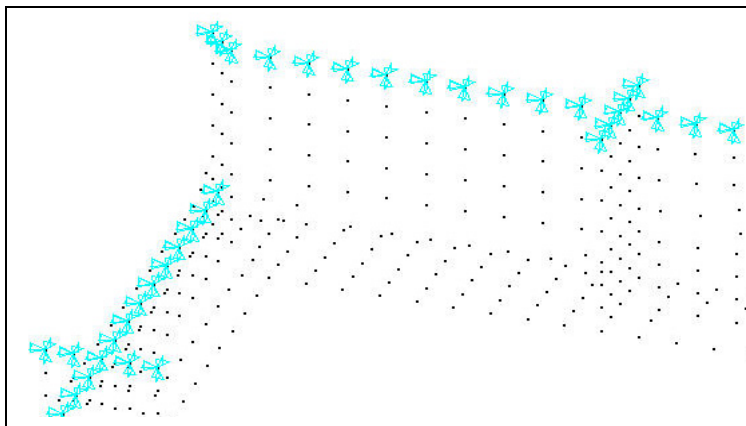


Obr. 3: Vnitřní plochy zásobníku zatížené tlakem výbuchu

Vazba uzlů horní hrany plechu zásobníku je na obrázku 4. Detail vazeb na obrázku 5, kde modré šipky ve směrech os globálního souřadného systému znamenají zamezení (odebrání) možného stupně volnosti. Tato vazba modeluje přivaření zásobníku na nosnou ocelovou konstrukci. Svar je klíčovým prvkem konstrukce, na kterém závisí její stabilita a odolnost vůči explozi



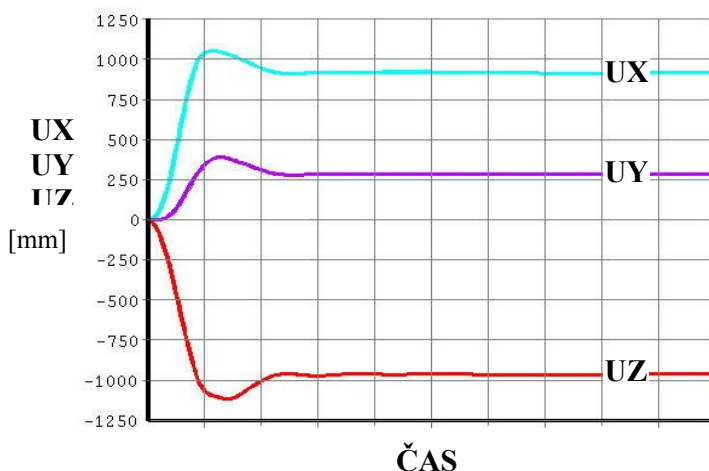
Obrázek 4: Vazba horní hrany uzlů výškového modelu



Obr. 5: Detail odebrání 3 stupňů volnosti horních uzlů plechů stěn i výztuh

## 2.1 Výsledky výpočtu

Výpočty byly realizovány v programu ANSYS [5]. Průběhy výsledného posunutí bodů, které dosáhly maximální výchylky během výbuchu ve směrech globálních souřadnicových os, jsou na obrázku 6. Je zřejmé, že výchylky UX, UY a UZ (deformace) jsou obrovské, ve směru vodorovných os X a Z jde o hodnoty větší než 1 m! Celá konstrukce je natolik zplastizovaná, že trvalá deformace zůstává i po skončení zatížení i na konci sledovaného časového úseku.



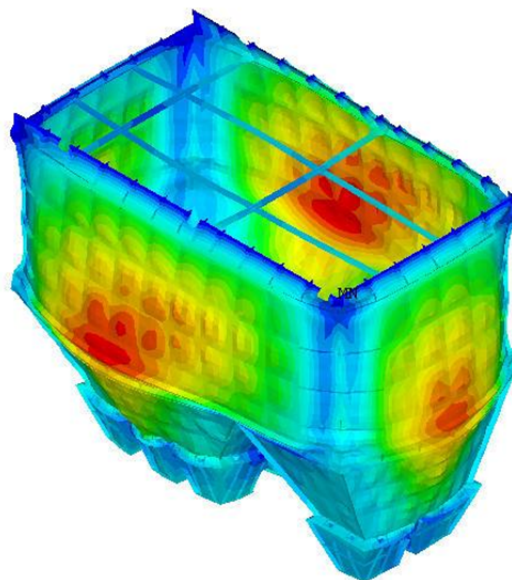
Obr. 6: Časový průběh vychylek bodů struktury s maximálními hodnotami posunutí v [mm]

Jak vypadá zdeformovaná konstrukce po ukončení celého dynamického děje je vidět na obrázku 7. Deformace jsou vykresleny v měřítku 1:1.

Trvalé deformace po modelovaném výbuchu jsou nepředstavitelně velké, až 977 mm. Pro komplexní posouzení účinku výbuchu musí být dále analyzován napěťový stav a hlavně celková poměrná deformace. Jestliže víme, že tažnost na mezi pevnosti materiálu je cca 20%, její významné překročení bude znamenat nevratné porušení materiálu. V posuzování nám pomáhá hodnota celkové ekvivalentní poměrné deformace (elastická i plastická)  $\epsilon_{HMH}$ , která přepočítává na základě energetické hypotézy víceosý napěťový stav na stav jednoosý. Hodnota  $\epsilon_{HMH} = 0,2$  je pak hodnotou mezní. Obrázek 8 dokazuje, že významné překročení mezních hodnot  $\epsilon_{HMH}$  je v místech přivaření konstrukce na nosnou ocelovou konstrukci.

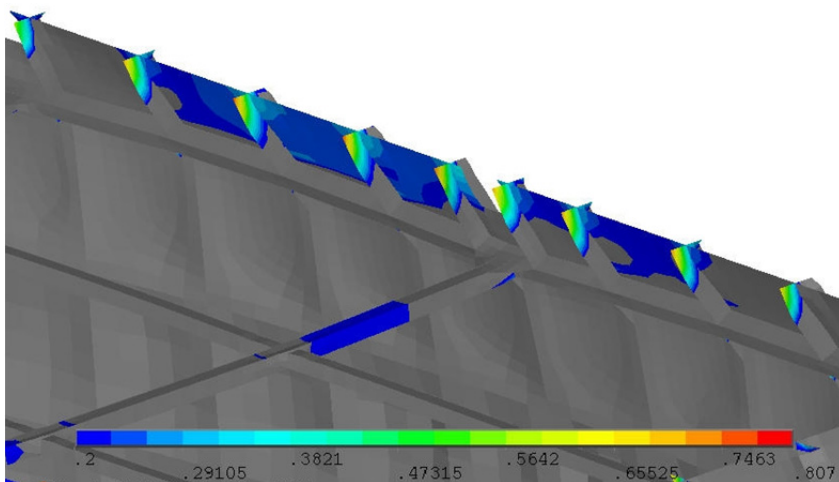


NODAL SOLUTION  
 STEP=3  
 SUB =145  
 TIME=.25  
 USUM (AVG)  
 RSYS=0  
 DMX =977.604  
 SMX =977.604



Obr. 7: Tvar trvale zdeformované konstrukce po ukončení dynamického děje (stupnice je uvedena v [mm])

Podle velikosti překročení lze usuzovat na postup destrukce, který výpočet nepostihuje. Nejdříve by se poškodil svar na konci výztužných žebér, kde dosahuje  $\epsilon_{HMH}$  až hodnoty 0,8. Porušení by dále pokračovalo až odtržením svislých plechů konstrukce. Zatížení se bude přenášet na stále menší průřezy svarů a dojde k destrukci celé konstrukce.



Obr. 8: Kritické překročení mezní poměrné deformace v oblasti upevnění (přivaření) zásobníku na nosnou OK (stupnice pro  $\epsilon_{HMH}$  je v rozmezí 0,2 – 0,8)

Z výsledků numerické simulace je zřejmé, že nosná OK zásobníku nepřenesla účinek plného zatížení od vnitřního výbuchu.

### 3 DYNAMICKÝ NELINEÁRNÍ VÝPOČET OD MAXIMÁLNÍHO TLAKU OCHRANNÉHO VÝFUKOVÉHO ZAŘÍZENÍ

Pokud nosná ocelová konstrukce není schopna bez destrukce přenést zatížení od vnitřního výbuchu prachu hnědého uhlí, nabízí se další řešení. Je to konstrukce bezpečnostního výfukového zařízení s definovaným průřezem  $A_{vyf}$  a s definovaným aktivačním tlakem  $p_{stat}$ . Při tomto tlaku se bezpečnostní systém uvede v činnost. Příloha D normy [1] uvádí následující vzorec pro stanovení  $A_{vyf}$ :

$$A_{vyf} = (4,485 \cdot 10^{-8} \cdot p_{max} K_{st} p_{red\ max}^{-0,569} + 0,027(p_{stat} - 10)p_{red\ max}^{-0,5}) V^{0,753}, \quad (3)$$

kde

$A_{vyf}$	je výfuková plocha v $[m^2]$
$p_{max}$	maximální tlak prachu v $[kN/m^2]$
$K_{st}$	deflagrační index oblaku prachu v $[(kN/m^2).m/s]$
$p_{red\ max}$	odhadnutý max. redukovaný tlak v nádobě s možností výfuku $[kN/m^2]$
$p_{stat}$	statický aktivační tlak s přihlédnutím k velikosti výfukových ploch $[kN/m^2]$
$V$	objem prostoru zásobníku v $[m^3]$ .

Lineární interpolací z údajů uvedených v příloze D normy [1], byly stanoveny hodnoty  $p_{red\ max} = 123,35 [kN/m^2]$ . Objem  $V$  i s prostorem nad zásobníkem byl odhadnut na  $550 [m^3]$ . Podle údajů zprávy [3] byla dosazena hodnota  $p_{max} = 720 [kN/m^2]$ . Pak pro variaci statického aktivačního tlaku  $p_{stat}$  od 10 do 50  $[kN/m^2]$ , dostáváme následující plochu výfukového systému:

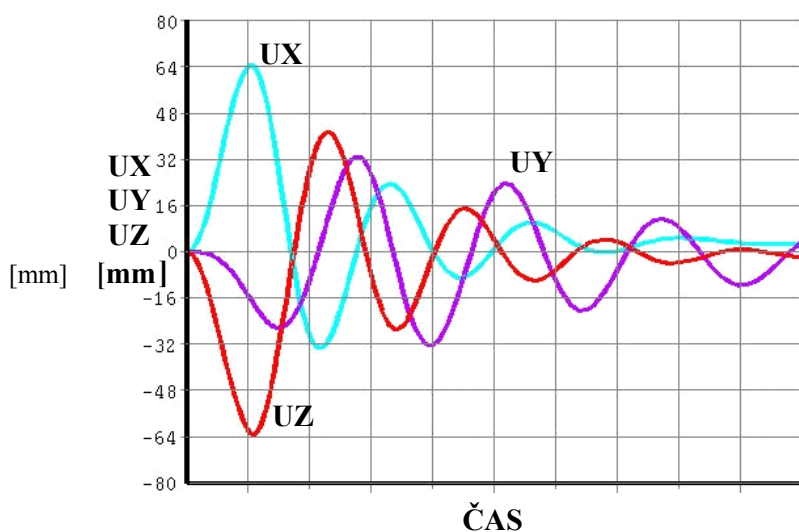
Tab. 3: Plocha výfukového systému v závislosti na aktivačním tlaku

$p_{stat} [kN/m^2]$	10	20	30	40	50
$A_{vyf} [m^2]$	4,4	7,2	10	12,9	15,7

Vyšší hodnoty plochy výfukového systému jsou zřejmě nereálné. Předpokládáme konstrukci výfukového systému s plochou  $10 m^2$ , kde tlak při kterém by mělo dojít k aktivaci je  $30 kN/m^2$ . Na základě těchto skutečností bude proveden kontrolní výpočet zásobníku na zatížení vyšší a to tlakem  $40 kN/m^2 = 0,04 MPa$ . Míra bezpečnosti tzv. dílčí součinitel zatížení je  $\gamma_F = 40/30 = 1,33$ . Podle podkladů [3] byl upraven i časový průběh zatížení zkrácením náběhu zatížení. Doba dozívání byla ponechána na  $t = 0,25 s$ . Dynamický účinek bude tedy vyšší, než v případě předcházejícího výpočtu, poněvadž náběh na maximální hodnotu tlaku je rychlejší.

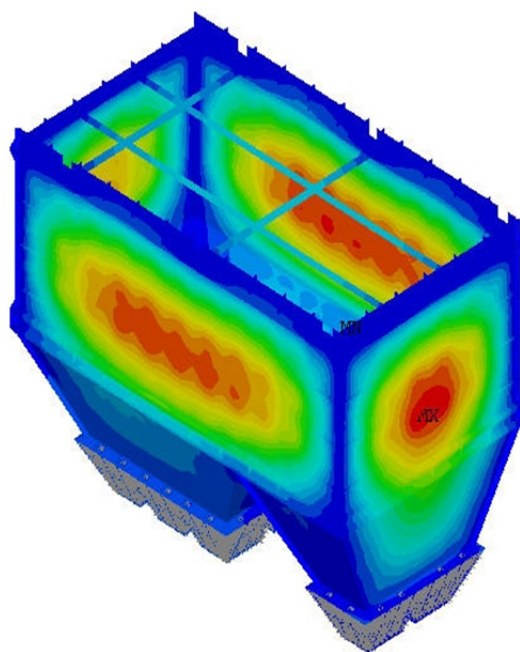
#### 3.1 Výsledky výpočtu

Veškerá posunutí v průběhu tohoto dynamického děje probíhají jen v pružné oblasti. Na obrázku 9 je vidět průběh výchylek bodů, které dosahují maxim v jednotlivých směrech souřadnicových os. Svislá maximální výchylka (střední průběh s hodnotou cca 33 mm) je dosažena jako účinek rozkmitání konstrukce vlivem tlakového impulsu. Že jde o elastické výchylky, potvrzují minimální hodnoty výchylek v koncovém čase 0.25 s, do kterého byla odezva konstrukce sledována. Tvary elastické deformace v okamžiku zatížení maximálním tlakem a po ukončení kmitání konstrukce jsou uvedeny na následujících obrázcích 10 a 11. Ve srovnání s předcházejícím zatěžovacím stavem jde o hodnoty minimální a to 63 mm a 4 mm. Jde jednoznačně pouze o pružné rozkmitání konstrukce, bez jakýchkoliv projevů zplastizování. Maximální hodnoty  $\epsilon_{HMH} = 0,038$  bylo dosaženo v čase maximálního zatížení. Na konci sledovaného časového úseku jde o zanedbatelnou hodnotu ekvivalentní plastické poměrná deformace  $\epsilon_{HMH} = 0,0073$ .



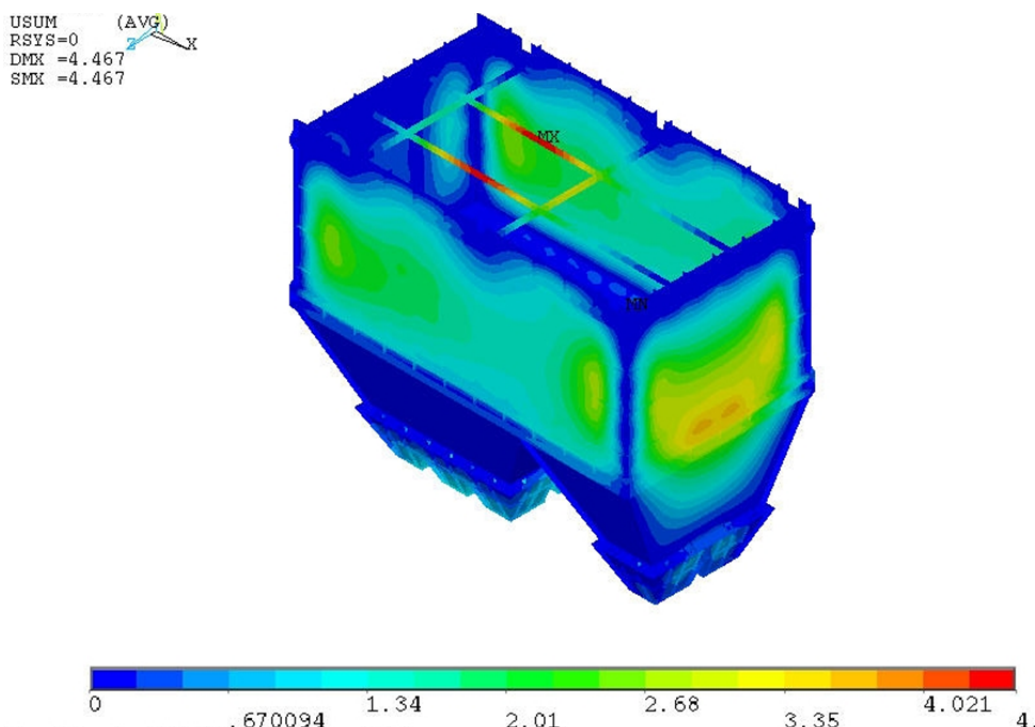
Obr. 9: Časový průběh maximálních výchylek uzlů konstrukce v [mm]

USUM (AVG)  
 RSYS=0  
 DMX =63.993  
 SMX =63.993



Obr. 10: Maximální výchylky uzlů konstrukce v okamžiku maximálního tlakového zatížení (stupnice je v [mm])





Obr. 11: Maximální výchylky uzlů konstrukce v okamžiku ukončení dynamického děje (stupnice je v [mm])

### 3 ZÁVĚR

Na základě výsledků počítačového modelování, kterým byl řešen účinek vnitřního výbuchu prachu hnědého uhlí zásobníku, je možné vyslovit následující závěry:

1. Plnou hodnotu tlaku od vnitřního výbuchu prachu hnědého uhlí není schopna nosná ocelová konstrukce zásobníku přenést. Klíčovým (kritickým) nosným místem je nejbližší okolí svaru spojujícího stěnu a výztuhy stěn zásobníku s vnější nosnou ocelovou konstrukcí. Pevnostní kontrola prokázala destrukci nosných stěn a výztuh zásobníku a to překročením meze pevnosti v tomto místě.
2. Bude-li zásobník hnědého uhlí shora uzavřen a vybaven systémem výfukových prvků o ploše minimálně  $10 \text{ m}^2$  se zajištěnou iniciací při tlaku  $0,03 \text{ MPa} = 30 \text{ kN/m}^2$ , ocelová nosná konstrukce zásobníku vnitřnímu výbuchu prachu hnědého uhlí odolá.

### PODĚKOVÁNÍ

Projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Ministerstva školství České republiky. Výzkumný záměr číslo MSM 6198910027.

## LITERATURA

- [1] ČSN EN 1991-1-7, *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení*, Český normalizační institut Praha, 2007, 64 s.
- [2] PORUBA, Z. *Neproporcionální namáhání materiálu*. Doktorská disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 2006. 138 s.
- [3] HANUŠ, A., PODSTAWKA, T. *Požárně technická charakteristika č. PTCH-00545*, materiál DB-prachové uhlí, zkušebna výbušnosti VVUÚ a.s., Ostrava-Radvanice, 5. 6. 2001.
- [4] CLOUGH, R.W., PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. 3rd edition, Computers & Structures Inc. 1995. 752 pp.
- [5] ANSYS® Academic Research, Release 12.0.1.

### Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Milan Sága, CSc., Fakulta strojní, Žilinská univerzita v Žilině

Prof. Ing. Alois Materna, CSc.